

# Die Bedeutung der Quantentheorie für die theoretische Elektrotechnik

Lautz, Günter

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 16, 1964,  
S.62-72



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

## **Die Bedeutung der Quantentheorie für die theoretische Elektrotechnik\*)**

Von Günter Lautz

Vorgelegt von Herrn E. Justi

(Eingegangen am 8. Oktober 1964)

**Übersicht:** Am Beispiel des elektrischen Durchschlages, des Tunneleffektes und der Supraleitung wird aufgezeigt, daß eine quantitative Erfassung elektrischer Leitungsvorgänge nur im Rahmen der Quantentheorie möglich ist.

*Summary: A complete theoretical interpretation of the electrical phenomena in solids requires the quantum theory. This claim is exhibited by the discussion of the electrical breakdown, the tunnel effect and the superconductivity.*

Die theoretische Elektrotechnik stellt nach der Meinung des Fachmannes jene Disziplin der Elektrotechnik dar, die sich mit der quantitativen Beschreibung der elektromagnetischen Vorgänge befaßt. Sie unterstützt den Ingenieur, konkrete Lösungen für ein auftretendes technisches Problem zu finden. Im allgemeinen sollte dabei eine enge Wechselbeziehung zwischen den Rechnungen einerseits und den konstruktiven Maßnahmen andererseits bestehen. Es ist nicht immer sinnvoll, von dem fertigen Teil einer Schaltanordnung nachträglich die elektromagnetischen Eigenschaften zu berechnen, da diese Rechnungen häufig nur mit erheblichem numerischen Aufwand durchführbar sind. Bei einem gründlichen Studium der theoretischen Zusammenhänge werden sich oft nur wenig von den ursprünglichen konstruktiven Vorstellungen abweichende elektrische Schaltteile ergeben, die in ihrem Verhalten theoretisch aber leichter durchsichtig sind. Diesen Zweig der theoretischen Elektrotechnik möchte ich den klassischen Zweig nennen.

Wie auf allen Wissensgebieten besteht auch heute in der Elektrotechnik eine außerordentlich stürmische Entwicklung. Weder in der Nachrichtentechnik noch in der Starkstromtechnik kann man an den neuen Erkenntnissen der physikalischen Forschung vorbeigehen. Experimente, die gestern noch Laboratoriumsversuche einiger weniger Physiker waren, sind heute Grundlage ganzer Industriezweige. Ich brauche dabei nur an die Vielzahl von Bauelementen zu denken, die in die Elektrotechnik Eingang gefunden haben und noch ständig Eingang finden.

\*) Erweiterte Fassung einer Antrittsvorlesung am 8. 5. 1963 an der Technischen Hochschule Braunschweig.

Um die Leistungsfähigkeit und die Anwendungsgrenzen neuer Werkstoffe und Werkstoff-Kombinationen und der aus diesen gefertigten Schaltteile beurteilen zu können, muß man sich mit den Vorgängen im Inneren dieser Substanzen befassen. Diese Aufgabe führt notwendig dazu, den atomistischen Aufbau der Materie zu berücksichtigen und die Ladungsbewegungen vom atomistischen Standpunkt aus zu betrachten. Für diese Dimensionen versagt aber die phänomenologische Maxwell'sche Theorie, die als klassische Disziplin den eingangs angedeuteten Bereich der theoretischen Elektrotechnik noch zu umfassen vermag. Hier müssen wir heute — und dazu ist auch der Ingenieur in vielen Fällen gezwungen — quantentheoretische Gesichtspunkte in den Vordergrund stellen.

Ich möchte an einigen Beispielen zeigen, in welchem Ausmaß quantentheoretische Rechnungen zur genaueren Erfassung der elektrischen Vorgänge erforderlich sind. Eine unmittelbare Konsequenz dieser Überlegungen ist das Postulat einer Vertiefung der Grundlagenausbildung unserer Studierenden, um ihnen die Bildungselemente zu vermitteln, die sie in ihrer späteren Zeit als Praktiker nutzbringend anwenden können und zu einem optimalen Arbeiten befähigen. Für die Notwendigkeit dieser Forderung möchte ich nur zwei Gesichtspunkte herausstellen:

- a) Der konstruktiv arbeitende Ingenieur wird sich stets überlegen müssen, bis zu welcher Leistungsfähigkeit gewisse Bauteile seiner Schaltung gezüchtet werden können. Dazu muß er den Mechanismus der physikalischen Vorgänge in allen Einzelheiten verstehen und übersehen, welche prinzipiellen Grenzen gesetzt sind.
- b) In der Elektrotechnik werden in der Zukunft eine Reihe von Erscheinungen Anwendung finden, die bisher nur im akademischen Rahmen von Bedeutung waren. Zu diesen Phänomenen gehört u. a. die Supraleitung, d. h. die reibungsfreie Elektrizitätsströmung in gewissen Metallen und ihren Legierungen. Es zeichnet sich heute ab, daß man in diesen Substanzen sehr starke Ströme widerstandslos fließen lassen kann. In dieser Weise sind Magnetfelder erzeugbar, deren Stärke für Energieumwandlungen und Kernfusionsprobleme durchaus in Betracht kommen. Diese Methode stellt das erfolgversprechendste Verfahren zur technischen Realisierung von Feldern über 100 000 Oe dar. Da heute bereits an vielen Stellen in der Welt derartige Großanlagen gebaut werden, wird man auf die konstruktive Mitwirkung von Elektroingenieuren nicht verzichten können, von Elektroingenieuren allerdings, die eine entsprechende Vorbildung besitzen.

In dieser Situation möchte ich für das Fachgebiet „Theoretische Elektrotechnik“ in Anspruch nehmen, daß es auch diesen subtileren und durchaus schwierigeren Teil der Deutung elektromagnetischer Vorgänge mit umfaßt. Wir begeben uns damit in einen Bereich, der bisher die Domäne der Physik gewesen ist und der nunmehr auch für den Ingenieur Bedeutung gewinnt.

Um den Einfluß der Quantentheorie zu erläutern, will ich zunächst auf einige Werkstoff-Fragen eingehen, die für die Elektrotechnik interessant sind. So ist z. B. die Durchschlagsfestigkeit eines Materials in der Starkstromtechnik eine stets erneut zu ermittelnde Eigenschaft. Große Anstrengungen werden unternommen, um wenigstens bei fehlerfreiem Aufbau eines Festkörpers quanti-

tative theoretische Angaben über die obere Grenzfeldstärke zu gewinnen. Aber auch in der Nachrichtentechnik haben derartige Untersuchungen Gewicht, da ein elektrischer Durchbruch den starken Stromanstieg von Halbleiterdioden, die in Sperrichtung gepolt sind, bestimmt. Theoretische Überlegungen dieser Art müssen notwendig quantenmechanisch fundiert werden.

Im wesentlichen unterscheidet man heute beim rein elektrischen Durchschlag zwei verschiedene Mechanismen. Sieht man von den besonderen Einflüssen der Kontaktelektroden ab, so kann eine beträchtliche Stromsteigerung bei einer bestimmten Spannung — oder besser Feldstärke — durch die feldbedingte Beschleunigung der Elektronen und anschließende Stoßionisation gebundener Elektronen erfolgen. Beim Zusammenstoß der Ladungsträger mit dem Kristallgitter — seinen Schwingungen und seinen Fehlern — wird die im freien Flug gewonnene Beschleunigungsenergie nicht mehr allein von den Gitterschwingungen aufgenommen, vielmehr wird ein wesentlicher Bruchteil dieser Energie zur Ionisation weiterer Atome oder Ionen genutzt. In diesem Korpuskelbild würde man fordern, daß die Elektronen insgesamt kinetische Energien von der Größenordnung der Ionisierungsenergien, d. h. einige eV erreichen müßten, um diesen Prozeß einzuleiten. Dann müßte aber die Elektronendrift  $\mu F$  um etwa zwei Größenordnungen über der thermischen Geschwindigkeit  $\sqrt{kT/m}$  liegen ( $\mu$  = Trägerbeweglichkeit,  $F$  = elektrische Feldstärke,  $k$  = Boltzmannkonstante,  $T$  = absolute Temperatur,  $m$  = effektive Trägermasse). Die dazu erforderlichen Feldstärken sind aber im Vergleich zum Experiment zu groß.

Diese Diskrepanz wird durch den statistischen Charakter quantentheoretischer Gesetze beseitigt. Es kommt nicht auf das Verhalten eines Einzelelektrons, sondern auf das Verhalten einer Gesamtheit  $f$  von Elektronen an, in denen es durchaus „Ausreißer“ gibt, die die Stoßionisation einleiten, ohne daß alle Elektronen daran teilnehmen. Sind  $f(\mathbf{r}, t)$  die Elektronen/cm<sup>3</sup>, deren Impuls in den Intervallen

$\hbar k_x = p_x \dots p_x + dp_x$ ,  $\hbar k_y = p_y \dots p_y + dp_y$ ,  $\hbar k_z = p_z \dots p_z + dp_z$  liegt, so muß für die zeitliche Veränderung der Verteilung  $f(\mathbf{r}, t)$  gelten:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{Stöße}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{Feldkräfte}}$$

mit

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{Stöße}} &= \iiint_{(\mathbf{r}')} \{ W(\mathbf{r}' \mathbf{r}) f(\mathbf{r}', t) - W(\mathbf{r}, \mathbf{r}') f(\mathbf{r}, t) \} d\mathbf{r}' + \\ &+ \iiint_{(\mathbf{r}')} W_i(\mathbf{r}', \mathbf{r}) f(\mathbf{r}', t) d\mathbf{r}' - \\ &- \frac{1}{2} f(\mathbf{r}, t) \iiint_{(\mathbf{r}')} W_i(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{r}' - f(\mathbf{r}, t) W_r(\mathbf{r}) \text{ *) **) } \end{aligned}$$

\*) Hier ist die bei schlechtleitenden Feststoffen wichtige Voraussetzung gemacht worden, daß nur wenige Elektronen/cm<sup>3</sup> vorhanden sind und daher die Elektronen untereinander „von ihrer Anwesenheit nichts merken“ (kein Pauli-Verbot).

\*\*) Der Faktor 1/2 tritt auf, da aus zwei langsamen Elektronen beim inversen Vorgang der Stoßionisation nur ein schnelles Elektron entsteht.

Dabei bedeuten  $W(\mathbf{r}', \mathbf{r})$  die zeitliche Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Elektron durch Wechselwirkungen mit dem Gitter vom Impulsvolumenelement  $d\mathbf{r}'$  nach  $d\mathbf{r}$  gebracht wird. Diese Größe ist nur quantentheoretisch herleitbar.  $W_i(\mathbf{r}', \mathbf{r})$  ist die zeitliche Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Elektron aus  $d\mathbf{r}'$  durch Stoßionisation ein solches in  $d\mathbf{r}$  erzeugt, und  $W_r(\mathbf{r})$  die zeitliche Wahrscheinlichkeit für eine Rekombination mit einer Störstelle. Alle diese Größen sind in atomistischen Modellen zu berechnen, einzusetzen, und sodann ist die Transportgleichung zu lösen. Eine sehr schwierige Aufgabe!

Das Ergebnis dieser Rechnungen zeigt, daß  $f(\mathbf{r}, t)$  nach einer Integration über alle Raumwinkel des Impulsraumes im wesentlichen nur noch von der Elektronenenergie  $E$  abhängt und oberhalb einer kritischen Feldstärke mit  $E$  stark zunehmen kann. In dieser Weise entstehen Elektronen genügend hoher Energie, die sie durch Stoßionisation wieder verlieren. Quantitativ ist die Festlegung einer kritischen Feldstärke als Durchschlagsfeldstärke möglich. Die Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment ist bei definierten Stoffen, wie z. B. Germanium und Silicium, befriedigend. Man erkennt so, daß  $F_{\text{krit}}$  auch in seiner Interpretation an die quantentheoretischen Vorstellungen gebunden ist.

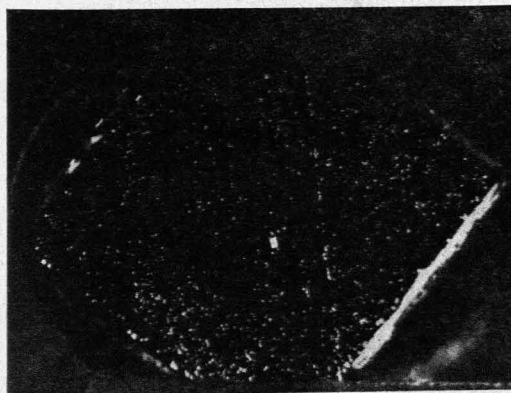
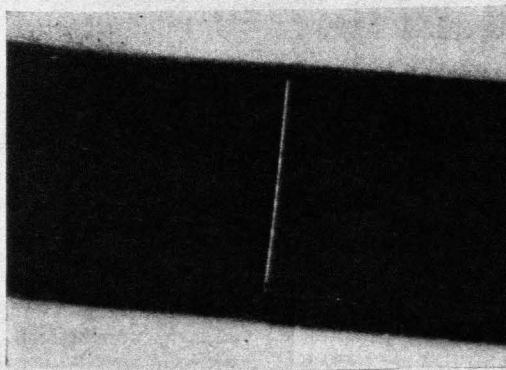


Abb. 1. Licht-Emission eines in Sperrrichtung gepolten  $p - n$ -Überganges in einem Silicium-Einkristall [1]

a) Aufsicht auf die etwa  $20 \text{ \AA}$  unter der Oberfläche befindliche Übergangszone



b) Seitenansicht einer derartigen Übergangszone

Natürlich dürfen die Versuchsproben nicht inhomogen sein, wie z. B. die p-n-Übergänge des Siliciums in der Abb. 1, wo Inhomogenitäten durch ungleiche Störstellenverteilungen beim Einlegieren oder Gitterfehler entstanden sind und durch Leuchterscheinungen sichtbar werden, da die schnellen Elektronen im Übergang rekombinieren und dabei ihre Energie optisch abstrahlen vermögen. Auch das ist ein quantenmechanischer und für die Theorie der p-n-Übergänge bedeutsamer Vorgang.

Die zweite Art des rein elektrischen Durchschlages ist sehr viel seltener. Sie tritt gelegentlich in sogenannten scharfen p-n-Übergängen bei der Polung in Sperrichtung oberhalb einer bestimmten Spannung auf. Dieser Zener-Durchschlag ist nur noch quantentheoretisch und nicht einmal mehr quasikorpuskular zu deuten:

Ähnlich wie in einem Atom stehen auch in einem Festkörper den Elektronen nicht alle möglichen Energiewerte zur Verfügung. Sie müssen im Sinne der Quantentheorie in den Kristall „hineinpassen“. Derartige Überlegungen führen theoretisch immer auf Eigenwertprobleme mit erlaubten und verbotenen Zuständen. Diese Bereiche haben in ihrer einfachsten Form bandartigen Charakter (Abb. 2). Die Energien  $E$  der Elektronen können auf  $E_L = 0$  normiert

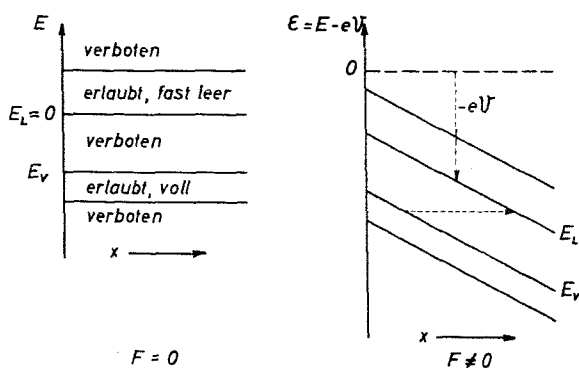


Abb. 2. Einfaches Energieband-Modell eines nichtmetallischen Festkörpers

werden und sind eine Kristalleigenschaft. Bringt man den Festkörper in ein äußeres elektrisches Feld, so erhalten die Elektronen die Zusatzenergie  $-eV$  ( $V$  = elektrostatisches Potential): Die „Bänder kippen“ (Abb. 2). Die Verkippung wächst mit grad  $V$ .

Nun wird in der Quantentheorie das Elektron nicht mehr als Teilchen, sondern als Welle behandelt. Der Wellencharakter ist um so ausgeprägter, je kleiner das Teilchen ist und je niedriger seine Energie bleibt. Eine Materiewelle repräsentiert ein Elektron als Wellengruppe. Unter der Einwirkung eines elektrischen Feldes kann nun eine solche Materiewelle den oberen Rand des Valenzbandes erreichen. Sie würde etwa in Analogie zur Wellenoptik eine Totalreflexion erfahren, bei der die Wellenamplitude exponentiell jenseits der Kante abfällt. Bringt man in der Optik in diesen „Abfallbereich“ einen Körper vom Brechungsindex des ersten Mediums, dringt die Welle teilweise durch das dichtere

Medium durch. Analog kann eine solche Durchtunnelung eines verbotenen Gebietes in der Quantentheorie des Festkörpers erfolgen. Je größer das elektrische Feld ist, um so wahrscheinlicher wird dieser Zener-Durchschlag. Dieser Tunnel-Effekt wird heute in der Elektrotechnik auch bei kleineren elektrischen Feldern genutzt. Es würde z. B. kein Lichtschalter funktionieren, wenn es diese Erscheinung nicht gäbe. Sehr augenfällig ist der Effekt bei der von Esaki 1958 entdeckten Tunneldiode. Ihre Leistungsgrenzen sind daher nur quanten theoretisch abzuschätzen.

Im Gegensatz zu einer gewöhnlichen Diode zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie im Flußbereich ein Maximum und ein Minimum des Stromes (Abb. 3).

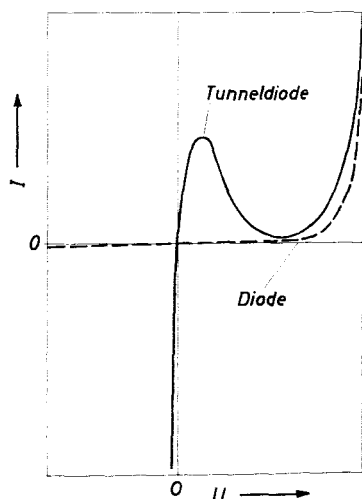


Abb. 3. Strom-Spannungs-Kennlinien einer gewöhnlichen Diode und einer Tunneldiode [2]

Während bei einem einfachen p-n-Übergang durch das Überströmen der beweglichen Ladungsträger im stromlosen Zustand eine kleine Potentialstufe entsteht, die für die Unsymmetrie der Kennlinie verantwortlich ist, erreicht diese Stufe bei den Tunneldioden infolge hoher Fremdstoffkonzentrationen fast die Breite der verbotenen Zone. In beiden Stromrichtungen ist der Stromfluß durch Tunnel-Effekt möglich (Abb. 4). Der Strom hängt von der Tunnel-Wahrscheinlichkeit (Quantentheorie!) und dem Produkt der Dichten der besetzten Zustände der einen Seite und der unbesetzten Zustände der anderen Seite ab:

$$j = \frac{4\pi e}{\hbar} \sum_k \int_{-\infty}^{+\infty} |M_{ab}|^2 q_a q_b (f_a - f_b) dE$$

( $\hbar k_t$  = transversale Impulskomponenten,

$q_a, q_b$  = Dichte der Zustände,

$M_{ab}$  = Matricelement des Überganges von  $a$  nach  $b$ )

In der „Sperrrichtung“ steigt der Strom mit der Spannung an, da sehr viel leere Zustände im Leitungsband vorhanden sind, die durch tunnelnde Elek-

tronen aus dem Valenzband gefüllt werden können. In der Flußrichtung nimmt der Strom zunächst zu, da im Valenzband und im Leitungsband für die jeweilige Trägerart leere Zustände vorhanden sind, allerdings vermindert sich der energetische Überlappungsbereich, so daß sich der Strom wieder verringert. Bei höheren Spannungen entsteht der normale Diodenstrom (Rekombination von Elektronen und Defektelektronen in der Übergangszone).

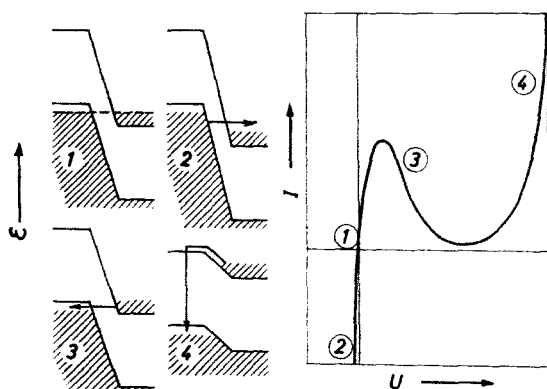


Abb. 4. Energiebandschemata für verschiedene Bereiche der Strom-Spannungs-Kennlinien einer Tunnel diode

Daß beim Tunnel-Effekt auch die quantisierten Gitterschwingungen Bedeutung haben, zeigt Abb. 5. Zur theoretischen Beherrschung dieses Bauelementes, das

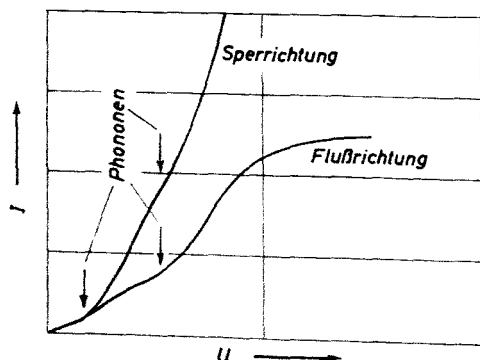


Abb. 5. Strom-Spannungs-Kennlinie einer Tunnel diode mit Andeutungen eines durch die Mitwirkung von Phononen (Gitterschwingungsquanten) begünstigten Tunnelstromes [3]

in der Nachrichtentechnik vielfache Anwendung findet (Schalter, Verstärker, Oszillator) sind also quantentheoretische Rechnungen unerlässlich.

Aber nicht nur der Elektrotechniker, der Tunnel dioden verwendet, muß sich mit diesen Fragen auseinandersetzen. Vielmehr haben die vorstehenden Überlegungen z. B. auch für die Kapazitätsprobleme der Mikromodultechnik (Abb. 6) und Festkörperkreise (Abb. 7) Bedeutung. Sie greifen daher in die Diskussion um den kleinsten Raumbedarf ein, den eine bestimmte Anzahl von Bauelementen benötigt. Das ist eine für die Raumfahrt und die datenverarbeitenden Maschinen gleichermaßen wichtige Frage.



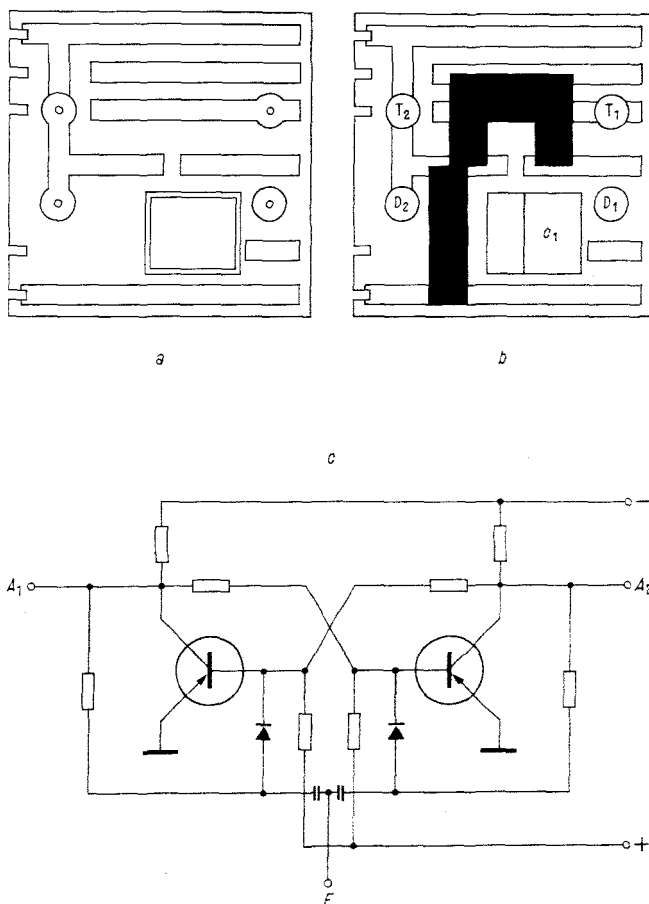


Abb. 6. Binäre Zählstufe als Mikromoduleinheit [4]

- a) Keramikplatte  $12,5 \cdot 12,5 \cdot 0,5$  mm mit metallischen Leitungsführungen
- b) mit Widerstandsschichten und eingesetzten Transistoren, Dioden und Kapazitäten
- c) Schaltbild

Dampft man z. B. auf eine 20 bis 40 Å dicke  $\text{SiO}_2$ -Schicht auf einem Silicium-Kristall Aluminium auf, so entsteht bei p-Silicium das Bandschema der Abb. 8. Wird das Metall negativ gepolt, gehen die Elektronen nicht zum Halbleiter über, weil keine unbesetzten Zustände gleicher Energie vorhanden sind. Diese Tunnelung erfolgt erst oberhalb einer bestimmten elektrischen Spannung. Bei umgekehrter Polung gilt Analoges. Daraus folgt die Strom-Spannungs-Kennlinie der Abb. 9. Im Zwischenbereich sind die Verhältnisse wegen der Oberflächeneinflüsse sehr komplex und nicht abschließend geklärt. Hier eröffnet sich der Forschung ein echtes Dorado.

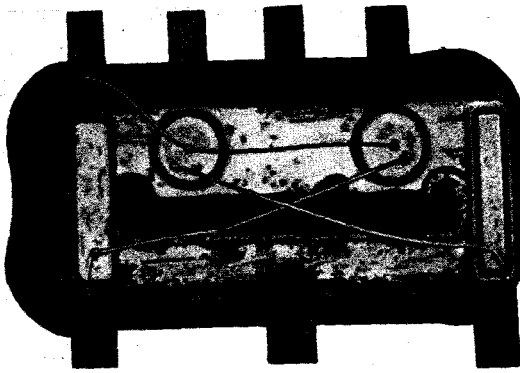
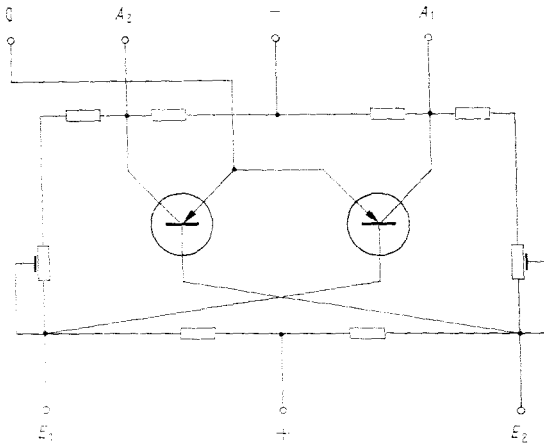


Abb. 7. Bistabiler Multivibrator als Festkörperkreis [5]

a) Technische Ausführungsform, Größe  $6 \cdot 3 \cdot 6$  mm



b) Schaltskizze in gleicher Anordnung

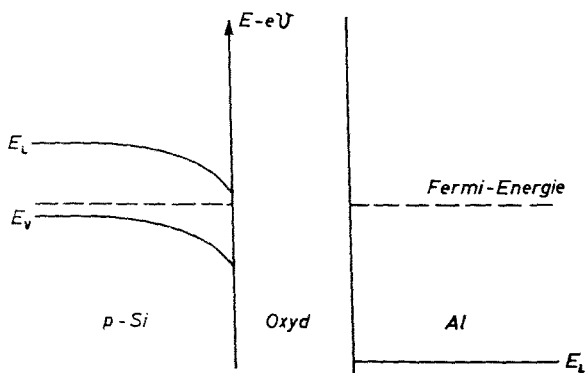


Abb. 8. Energiebandschema einer „sandwich“-Anordnung aus p-Si-SiO<sub>2</sub>-Al

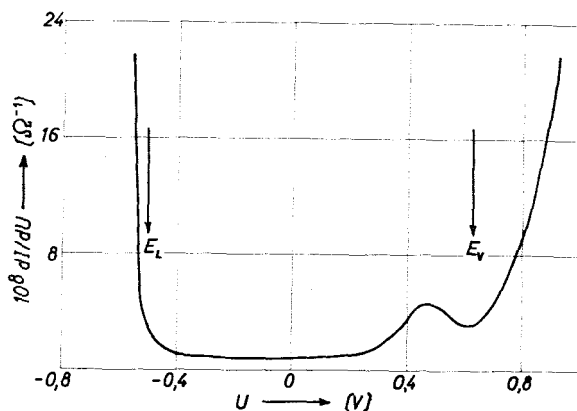


Abb. 9. Strom-Spannungs-Kennlinie der Anordnung aus Abb. 8

Der Einfluß der Quantentheorie ist sehr viel vielgestaltiger als ich ihn hier auch nur anzudeuten vermag. Vielleicht ist inzwischen bekanntgeworden, daß im Zusammenhang mit den quantenmechanischen Verstärkern, wie Maser und Laser, ein neues Gebiet, die Quantenelektronik, sich herauszubilden beginnt. Auf diese bedeutsamen Untersuchungen brauche ich nicht im einzelnen einzugehen, da bei ihnen die quantentheoretische Grundlage evident ist und diese Erscheinungen zudem Hauptforschungsgebiet anderer Institute dieser Hochschule sind.

Zum Schluß dieser Ausführungen möchte ich noch einmal auf das schon eingangs gestreifte Problem der Supraleitung eingehen. Auch diese Eigenschaft ist nur quantenmechanisch zu verstehen.

Die Supraleitung ist grob gesagt durch die Gleichungen  $\vec{J} = 0$  und  $\vec{B} = 0$  im Inneren der idealen Materialien charakterisierbar. Diese Stoffe sind widerstandsfreie (wenigstens bei niedrigen Frequenzen) und ideal diamagnetische Substanzen, sofern ein kritischer magnetischer Schwellwert nicht überschritten wird. Durch technologische Entwicklungen geeigneter Legierungen und intermetallischer Phasen ist es in den letzten Jahren gelungen, diese kritischen Werte beim Eigenfeld auf mehr als 100 000 Oe zu erhöhen. Damit ist es heute möglich, starke Magnete mit supraleitenden Spulen zu konstruieren. Magnete, wie sie z. B. die Kernfusion benötigt. Eine Abschätzung der erreichbaren Grenze wird z. Z. von einigen Theoretikern versucht.

Dabei begibt man sich weiter in die Tiefe quantentheoretischer Vorstellungen. Während bisher die einfache Schrödinger-Theorie mit der Ermittlung einer Wahrscheinlichkeits-Amplitude der Materiewellen in Verbindung mit klassischen Feldvorstellungen benutzt wurde, geht man in der Bardeen'schen Theorie zur Quantenfeldtheorie über, bei der nun auch die Feldgleichungen einer Quantisierung unterworfen werden. In einer solchen Theorie treten Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren auf, die die Entstehung und Zerstörung materieller Teilchen enthalten. Ihre Beschreibung überschreitet den Rahmen dieser Vorlesung. Eine bedeutende Konsequenz dieser Theorie war

die Forderung der Existenz einer Lücke im Energiespektrum der Leitungselektronen der Metalle. Es kann als Triumph dieser Theorie gewertet werden, daß man diese Energielücke nachträglich experimentell in quantitativer Übereinstimmung mit den Rechnungen gefunden hat. Daß eine solche Energielücke z. B. den Diamagnetismus erklären kann, liegt für den Theoretiker auf der Hand, jedoch braucht man dazu quantentheoretische Postulate.

Damit sind wir an einer Grenze angelangt, wo die elektrotechnische Forschung in die rein physikalische Forschung um der Gewinnung reiner Naturerkenntnisse willen übergeht. Diese Grenze wird sich in den kommenden Jahren immer stärker in den Bereich der heutigen Physik verschieben, eine Entwicklung, der unsere Hochschulen größte Aufmerksamkeit widmen sollten, um stets die Studierenden in ihrer technisch-naturwissenschaftlichen Bildung so zu lenken, daß sie den Erfordernissen einer sich unaufhaltsam, mit atemberaubender Geschwindigkeit entwickelnden Technisierung der Welt gewachsen sind.

### Literatur

- [1] A. G. Chynoweth, K. G. McKay, Phys. Rev. **102**, 369, 1956.
- [2] R. Gremmelmaier, Festkörperprobleme I, S. 20, Vieweg-Verlag, Braunschweig 1962.
- [3] N. Holonyak, I. A. Lesk, R. N. Hall, J. J. Tiemann, H. Ehrenreich, Phys. Rev. Lett. **3**, 167, 1959.
- [4] T. A. Prugh, J. R. Nall, N. J. Doctor, Proc. IRE **47**, 885, 1959.
- [5] J. S. Kilby, Electronics **7**, 8, 59, S. 110.